

# Die grundlegenden Prinzipien der Automatisierung - ein Überblick

von Wolfgang Weller

## 1. Automatisierung als Fachdisziplin

Die Automatisierung ist nicht nur eine gewöhnliche Technologie. Automatisierung ist ein grundlegendes Prinzip, welches zielgerichtetes Verhalten und ein Miteinander überhaupt erst ermöglicht. Das Teilwort „auto“ leitet sich aus dem griechischen Wort *αὐτός* mit der Bedeutung *selbst* ab. Unter Automatisierung versteht man demnach das selbsttätige u. U. sogar selbstständige zielorientierte Verhalten von Systemen. Dieses findet in einer Gesamtheit (einem System) statt, welche mehrere Komponenten (die Elemente) enthält und deren Zusammenwirken darauf gerichtet ist, von sich aus, d. h. ohne äußere Eingriffe, Ziele zu erreichen bzw. einen Zielzustand aufrecht zu erhalten.

Automatisierte Systeme leisten einen beständigen Beitrag zur industriellen Wertschöpfung und dienen dem Fortschritt, erleichtern die Arbeitstätigkeit von Menschen, verbessern den gebotenen Komfort und tragen zur Erhöhung des Sicherheitsniveaus bei. Selbsttätige Verhaltensweisen trifft man auch in der Natur und Gesellschaft in vielfältigster Form an. Diese realisierungsübergreifende Bedeutung der Automatisierung im Zusammenwirken mit der Kommunikation hat wohl als erster der österreichisch-amerikanische Wissenschaftler *Norbert Wiener* erkannt, der mit seinem Buch *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine* die Wissenschaftsdisziplin *Kybernetik* begründet hat.

Wie der im Buchtitel enthaltene Anspruch andeutet, gehören zu den automatisierten Systemen einerseits die natürlichen Systeme jeglicher Art. Dazu zählen neben der Gesamtheit der Lebewesen (*animals*) auch die ökologischen, gesellschaftlichen und viele andere das Zusammenleben der Menschen betreffende Systeme. Lebewesen verfügen darüber hinaus auch über eine Vielzahl selbsttätig funktionierender intrakorporaler Systeme, welche der Aufrechterhaltung der Lebensfunktionen sowie der Auseinandersetzung mit ihrer Umgebung dienen. Stellvertretend dazu seien das Herz-Kreislauf-System und die verschiedenen Stoffwechselsysteme genannt. Selbst das aufrechte Gehen sowie die Auge-Hand-Koordination zählen zu den selbsttätig arbeitenden Systemen.

Die andere große Gruppe der in die Kybernetik eingebetteten Systeme sind Automatisierungssysteme technischer Art (*machines*). Hierbei handelt es sich um künstliche, also vom Menschen geschaffene Systeme, welche in der Kategorie Automatisierungstechnik zusammengefasst werden. Der Begriff „Technik“ ist hier in zweierlei Hinsicht bedeutsam. Zum einen bezieht sich die Automatisierung hier auf Prozesse technischer Art. Des Weiteren werden zur Automatisierung auch technische Mittel (Automaten) eingesetzt, um das gewünschte selbsttätige und zielgerichtete Verhalten zu realisieren.

Schaut man zunächst auf die Entwicklung dieser Disziplin, so begann, nach weniger bedeutsamen Frühformen (bspw. antike Spielautomaten), der Siegeszug der automatisierten technischen Systeme mit der Einführung der drehzahlgeregelten Dampfmaschine und den automatisierten Webstühlen. Seither hat die Automatisierungstechnik einen furiosen Aufschwung genommen und leistet neben der Kommunikationstechnik einen unverzichtbaren Beitrag sowohl zur aufstrebenden gesamtheitlichen technologischen Entwicklung als auch der unmittelbaren Verbesserung unseres Lebens. Ohne die Automatisierungstechnik würden nicht rund um die Uhr Produkte in gleichbleibender Qualität in hocheffizienten Produktionsprozessen erzeugt, könnten wir nicht auf eine stabile Medienversorgung vertrauen, gäbe es keine Kühlschränke und komfortable Heizungen, hätten wir nicht den hohen Sicherheitsstandard oder gar selbstfahrende Autos und viele andere Nützlichkeiten mehr.

Die Mittel zur Realisierung automatisierungstechnischer Funktionen haben im Laufe der Entwicklung einen mehrfachen Wandel durchlaufen. Waren es in der Frühzeit zunächst mechanische Lösungen, so basierten spätere Realisierungen auf hydraulischen, pneumatischen, elektromechanischen und elektronischen Wirkprinzipien. Heutige Automatisierungssysteme basieren bei der Funktionsrealisierung weitgehend auf der Verwendung von Daten und Programmen.

Die in zunehmender Vielfalt entstandenen Automatisierungslösungen haben zur Entwicklung ganz unterschiedlicher Lösungen geführt, die auf Wirkprinzipien spezieller Art beruhen. Hierbei werden inzwischen Funktionalitäten realisiert, die bis in den Bereich der Künstlichen Intelligenz reichen. Entsprechend dieser Verschiedenartigkeit empfiehlt es sich, eine Behandlung der automatisierungstechnischen Lösungen entsprechend den zugrunde liegenden spezifischen Prinzipien vorzunehmen. Dazu werden wir eine Gruppierung einführen und für jede Kategorie den jeweiligen Funktionsmechanismus grob erläutern, die Eigenschaften solcher Systeme benennen, Hinweise zum jeweiligen theoretischen Hintergrund liefern sowie mindestens ein Anwendungsbeispiel erläutern.

## **2. Regelungssysteme**

Zu den am frühesten eingesetzten und auch heute noch verbreitetsten Automatisierungsprinzipien gehören die (automatischen) Regelungen. Diese sind dadurch gekennzeichnet, dass eine, ggfs. auch mehrere, Prozessvariable, die Regelgröße(n) genannt werden, fortlaufend selbsttätig an eine externe Größe, die Führungsgröße, angeglichen werden. Die durch eine Automatisierungseinrichtung (den Regler) zu lösende Aufgabe besteht also darin, die aus der Differenz von Führungs- und Regelgröße gebildete Regelabweichung möglichst klein zu halten – im Idealfall also auf dem Wert Null zu bringen. Um dieses Ziel zu erreichen und aufrechtzuerhalten, muss auf den jeweiligen Prozess eingewirkt werden, wofür mindestens eine Stellgröße benötigt wird. Die Funktion des Reglers besteht dann darin, die Stellgröße unter beständiger Beobachtung der Regelabweichung derart zu dosieren, dass das Automatisierungsziel eingehalten wird. Zur Verbesserung des dynamischen Verhaltens werden neben der Regelabweichung ggfs. auch deren Änderungsgeschwindigkeit sowie der Integralwert ausgewertet.

Diese zunächst sehr einfach klingende Regelungsaufgabe ist dennoch oft nicht ohne weiteres zu lösen. Hauptursache dafür ist die Funktionsstruktur, der ein in sich geschlossener Wirkungsablauf mit negativer Rückführung zugrunde liegt. Infolge der bestehenden Rückkopplung kann es bei zu starken Stelleingriffen zu Instabilitäten kommen, die zur Unbrauchbarkeit der Regelung führen. Die Lösung des Regelungsproblems kann auch dadurch erschwert werden, dass der Prozess eine große Trägheit aufweist, Prozessnichtlinearitäten vorhanden sind, auf die Regelgröße nur zu diskreten Zeitpunkten zugegriffen werden kann oder auch mehrere untereinander verkoppelte Prozessgrößen gleichzeitig zu regeln sind.

Angeichts der schwer überschaubaren Informationskreisläufe in Regelungssystemen entstand frühzeitig ein Bedarf an geeigneten Methoden zur Beschreibung, Bewältigung des Entwurfs und der Analyse derartiger Systeme. Während zu Entwicklungsbeginn der Regelungstechnik dafür nur eher einfache Verfahren zur Verfügung standen, wurde inzwischen auf mathematischer Grundlage ein ganzes Theoriengebäude entwickelt. So entstanden entsprechend den unterschiedlichen Anforderungen eine Vielzahl mathematisch basierter Methoden zur Systembeschreibung, Behandlung des Stabilitätsproblems, der Systemidentifikation und Modellbildung sowie für den Systementwurf für die verschiedenen Arten von Regelungssystemen. Dieses Methodenspektrum wird heute im Rahmen einer Regelungstheorie zusammengefasst.

Bezüglich der Anwendung von Regelungen sind zwei unterschiedliche Fälle zu unterscheiden. Zum einen werden Regelungssysteme benutzt, um die Regelgröße trotz auf den Prozess einwirkender Störungen konstant zu halten. Der entsprechende Wert wird dabei durch die Führungsgröße vorgegeben, sodass diese einen Festwert vorgibt, der Sollwert genannt wird. Ein typisches Beispiel dafür sind Temperaturregelungen, wie sie nicht nur in Produktionsprozessen, sondern beispielsweise auch in der häuslichen Heizung eingesetzt werden. Außer der Temperatur als Regelgröße findet man in der Praxis eine nahezu unbegrenzte Zahl anderer physikalischer Größen, die zu Regelungszwecken benutzt werden.

Regelungssysteme werden ebenfalls eingesetzt, wenn die Aufgabe darin besteht, einer diesmal variablen Führungsgröße möglichst nah zu folgen. In diesem Fall spricht man von einer Folgeregelung. Typische Einsatzfälle sind Steuerung von Drohnen bei manueller Kursvorgabe oder das Verfolgen von Flugobjekten.

### 3. Optimale Steuerungssysteme

Das funktionelle Repertoire der Regelungstechnik wurde in den 60er Jahren des zurückliegenden Jahrhunderts durch die Einführung des Konzepts der (zeit-)optimalen Steuerungen wesentlich erweitert. Steuerungen dieser Art ermöglichen kürzestmögliche Übergänge vom vorliegenden (Anfangs-)Zustand in den gewünschten Zielzustand. Zur Lösung dieser Aufgabe bedarf es der vollständigen Systeminformation, weshalb eine Behandlung auf der Ebene des (System-)Zustandes erforderlich ist. Die optimale Systembewegung lässt sich im Zustandsraum an Hand einer Kurve, die Trajektorie genannt wird, verfolgen. Das Zustandskonzept basiert auf mathematischen Methoden, deren Einführung auf *Lagrange* zurückgeht. Die Systembehandlung erfolgt hier auf der Basis von Vektordifferentialgleichungen 1. Ordnung.

Bei der Zustandsbehandlung stellt sich das Problem, dass häufig nicht sämtliche der den Zustand bestimmenden Zustandsvariablen sensorisch erfassbar sind und somit auch nicht dem Zustandsregler zugeführt werden können. Dies gilt insbesondere für komplexere Systeme, die eine größere Anzahl von Speichern beinhalten. Man kann sich dann mit einer Schätzung von Zustandsvariablen behelfen. Dafür gibt es eine Lösung in Gestalt des Zustandsbeobachters (observers), dessen Konstruktion auf *Luenberger* zurückgeht.

Der Entwurf zustandsbasierter optimaler Steuerungen stellt gegenüber den klassischer Regelungen deutlich höhere Ansprüche an den Systementwickler. Dessen Tätigkeit kann durch die Verwendung von Entwicklungswerkzeugen unterstützt werden, unter denen die sog. Tool-box *Matlab for Control Systems* der US-Firma *The Math Works Inc.* die größte Verbreitung gefunden hat. Dieses Tool enthält eine Fülle nützlicher Softwarewerkzeuge zur Bewältigung unterschiedlicher Aufgaben der Systemanalyse und des Entwurfs sowie auch mehrere Compiler. Mit ihrer Unterstützung ist der Systementwickler in der Lage, selbst komplexe Systementwürfe auszuführen.

Das Ergebnis der Mühen sind dann automatische Systeme, die ein dynamisches Verhalten von nicht zu überbietender Qualität besitzen. Zur Verdeutlichung der Leistungsfähigkeit der optimalen Steuerung sei auf Einsatzfälle verwiesen, die einen Ausgleich der Schwingungen pendelnder Lasten ermöglichen, wie sie beispielsweise an Kränen oder Lasten transportierenden Hubschraubern auftreten.

### 4. Prozessoptimierende Systeme

Die Aufgabe besteht hier in der selbsttätigen Optimierung einer systeminternen Prozessgröße von zumeist Leistungscharakter. Als Kriterium wird eine Zielgröße benötigt, die messbar sein muss. Das angestrebte Extremum kann entweder Maximum- oder Minimumcharakter aufweisen. Bei Systemen dieser Art steht die Optimumsuche und –haltung im Vordergrund; das dynamische Verhalten ist hingegen von zweitrangiger Bedeutung. Die hierzu benötigte Automatisierungseinrichtung wird Optimisator genannt.

Die Besonderheit besteht diesmal darin, dass der Wert des Optimums nicht bekannt ist. Es gibt also – im Gegensatz zu den Regelungssystemen – hier keine externe Größe, welche die Zielgröße anzeigt. Das System ist somit auf sich selbst gestellt, um das unbekannte Optimum zu finden und auch einzuhalten. Die Funktionsweise basiert dementsprechend zumeist auf Prinzipien der maschinellen Suche. Der Optimisator generiert beständig Suchbewegungen, indem er in zumeist periodischer Folge

Stellgrößen selbstbestimmten Wertes ausgibt. Nach jeder Verstellung werden die zugehörigen Systemreaktionen ausgewertet. An Hand eines Vergleichs mit dem einen Takt zuvor ermittelten Wert wird festgestellt, ob sich dieser verbessert oder verschlechtert hat. Entsprechend der üblicherweise verwendeten Strategie wird die Stellgröße in jedem Takt solange vergrößert, als sich der Gütewert verbessert. Beginnt sich diese Tendenz hingegen umzukehren, so wird im nachfolgenden Stellschritt die zuletzt ausgegebene Stellgrößenerhöhung zurückgenommen und stattdessen verkleinert. Interessant ist das Verhalten nach Erreichen des Optimums. Hier werden entsprechend der zugrunde gelegten Strategie kleine Stellschritte wechselnder Richtung ausgegeben. Auf diese Weise können auch Verlagerungen des Optimums erkannt werden. Zur Verbesserung der Dynamik kann auch die Schrittweite der Verstellungen während des Optimierungsprozesses modifiziert werden, indem diese mit Annäherung an das Optimum verkleinert wird.

Die selbsttätige Optimumsuche und –haltung wurde bereits seit Jahrhunderten bei den sog. Holländerwindmühlen angewandt. Das Optimierungskriterium besteht dort in der Maximierung der Leistungsausbeute, erreicht durch die selbstständige Einstellung auf die Richtung der jeweiligen Windanströmung. Die gleiche Aufgabe findet sich auch bei den modernen Windkraftanlagen zur Gewinnung von elektrischem Strom aus regenerativer Quelle. Ein Anwendungsbeispiel für die Optimierung auf den Minimalwert liefert die Verbrennungsoptimierung. Als messbares Optimierungskriterium dient hier die Temperatur oder Leistungsausbeute. Die Stellgröße ist in diesem Fall die Relation von Brennluft zu Brennstoff.

## **5. Selbstorganisierende Systeme**

Eine allgemein weniger im Focus automatisierungstechnischer Betrachtung stehende Kategorie selbsttätig wirkender Systeme sind die selbstorganisierenden Systeme. Die Einführung dieses Begriffs wird *W. A. Clark* und *B. G. Farley* zugeschrieben.

Aus kybernetischer Sicht sind selbstorganisierende Systeme sich wandelnde Gesamtheiten, die Selbstentwicklungsprozesse durchlaufen, in deren Ergebnis eine höhere strukturelle Ordnung erreicht wird. Die Besonderheiten dieser Systemkategorie bestehen darin, dass die Veränderungen innerhalb der Systeme stattfinden, diese selbsttätig erfolgen, von den darin enthaltenen Elementen ausgehen, indem diese miteinander wechselwirken, und keine externe steuernde Instanz an diesem Wandel beteiligt ist.

Handelt es sich bei diesen Gesamtheiten um aus verschiedenen Elementen neu zusammengestellte Systeme, so besteht zu Beginn Unordnung. Die innerhalb des Systems selbsttätig ausgeführten Handlungen sind in dieser Phase weitgehend zufallsbestimmt. Im Verlauf der Selbstorganisationsprozesse entwickelt sich eine bestimmte interne Struktur, die zu einer gewissen Ordnung führt. Die real existierenden selbstorganisierenden Systeme haben jedoch üblicherweise bereits einen gewissen Entwicklungsstand bzw. ein bestimmtes Maß an Ordnung erreicht. Der weitere Entwicklungsprozess bewirkt dann nur noch eine Verbesserung dieses Ordnungszustandes bzw. – bei Veränderung der Umgebung – das Anstreben einer neuen Ordnung. Selbstorganisierende Systeme verfügen somit über die Fähigkeit, sich wechselnden Umgebungen anzupassen. Die im Verlauf des Entwicklungsprozesses zunehmend erlangte Ordnung drückt sich vielfach im Anstreben eines inneren Gleichgewichtszustandes aus, der auf dem Arrangement der Elemente basiert.

Die Selbstorganisation ist nicht nur in der Systemtheorie ein wichtiger Begriff zur Bezeichnung einer bestimmten Art selbsttätigen Verhaltens von Systemen, sondern hat weitreichende Bedeutung in der Praxis. So findet man selbstorganisierendes Verhalten in natürlichen, sozialen, biologischen, physikalischen, chemischen, ökonomischen und vielen weiteren dynamischen Systemen.

Wenn Systeme mit selbsttätiger Gleichgewichtssuche und –haltung derart verbreitet sind, dann handelt es sich bei diesen offensichtlich um eine wesentliche Kategorie von Automatisierungssystemen, auch

wenn diese im Bereich der Technik bisher nur geringere Bedeutung erlangt hat. Somit ist eine eingehendere Behandlung angebracht. Dementsprechend werden wir nachfolgend einige Beispiele grob erläutern, um den bestehenden Wirkungsmechanismus zu verdeutlichen.

Wir beginnen mit einem einfachen Ökosystem, in dem sich die Populationen von Füchsen und Hasen gegenüberstehen sollen. Die Interessenlagen sind dadurch bestimmt, dass die Füchse bestrebt sind, genügend Hasen zu jagen, um ihre Population zu ernähren, während andererseits die Hasen sich diesem Bestreben soweit wie möglich zu entziehen suchen, um selbst zu überleben. Die Funktionsweise dieses Ökosystems ist dadurch gekennzeichnet, dass die Füchse zwar Hasen erbeuten, was allerdings eine Dezimierung des Bestandes an Hasen zur Folge hat. Mit der Abnahme der Hasen verringert sich aber auch das Jagdglück der Füchse, was dann zur Reduzierung ihrer Population führt. Es besteht somit eine wechselseitige Verkopplung der eigenständigen Tätigkeiten von Füchsen und Hasen. Das Wechselspiel zwischen beiden Populationen erfolgt in einem dynamischen (Entwicklungs-)Prozess, an dessen Ende es zu einem Ausgleich auf gewissem Niveau kommt. Dieser Gleichgewichtszustand ermöglicht dann das Überleben beider Tierarten. Ändert sich die Umgebung, so wird ein neuer Gleichgewichtszustand angestrebt, der dann auf einem anderen Niveau liegt.

Das Beispiel lässt sich noch auf komplexere Ökosysteme erweitern, die weitere Tierarten enthalten, welche ihrerseits paarweise in einer Jäger-Beute-Relation stehen. Dazu betrachten wir ein Ökosystem, das 4 Ebenen enthalten soll, die in einer hierarchischen Ordnung stehen. Auf der untersten Ebene sind diverse Pflanzen, wie Gräser, Beeren, Moose, Flechten etc., angesiedelt. Diese bilden die Nahrungsgrundlage für niedere Tiere der 2. Ebene, zu denen verschiedene Arten von Insekten und Weichtieren gehören. Von diesen ernähren sich wiederum die Tiere der 3. Ebene, wie Mäuse, Frösche, kleine Vögel, Hasen u. a. Die 4. Ebene bildet die Spitze der Pyramide, der Füchse, Raubvögel, Störche etc. angehören. Diese machen dann Jagd auf die Lebewesen der unterlagerten 3. Ebene. Wie ersichtlich, bestehen zwischen jeweils benachbarten Ebenen die gleichen Relationen des Fressens und Gefressen Werdens wie bei dem zuvor beschriebenen Hase-Fuchs-System. Dass solche komplexeren Ökosysteme überhaupt fortbestehen, zeigt, dass diese ebenfalls in der Lage sind, selbsttätig einen Ausgleich zu finden. Allerdings findet hier ein wesentlich komplexeres Zusammenspiel der Kontrahenten statt als bei dem zuvor betrachteten Beispiel.

Ein ganz ähnliches Beziehungsgeflecht wie bei den zuvor geschilderten Ökosystemen lässt sich auch auf freien Märkten beobachten. Die Hauptakteure sind hier die Händler und Kunden, die jeweils eigenständige und dabei sich entgegenstehende Interessen verfolgen. Wie allgemein zu beobachten ist, einigen sich die Beteiligten am Ende doch auf einen Gleichgewichtszustand, der sich jedoch bei häufig wechselnder Marktlage verändert.

Wie aus den Beispielen hervorgeht, gibt es hier keine von außen zugeführten Führungsgrößen, die bei der Systementwicklung eine Orientierung bieten würden. Ebenso sind erwartungsgemäß keinerlei Steuereinrichtungen oder Regler natürlicher oder gar künstlicher Art zu finden, die ein solches zielführendes Verhalten bewirken könnten. Die im Verlauf eines Entwicklungsprozesses zustande kommende Annäherung an einen Gleichgewichtszustand muss daher allein durch interne Mechanismen zustande gekommen sein. Maßgebend dafür sind offenbar strukturelle Besonderheiten in Gestalt von sich überkreuzenden Rückführungen mit negativem Wirkungssinn zwischen den Teilsystemen. Der Ausgleich ist somit auf Regelungsvorgänge zurückzuführen, welche sich wechselseitig beeinflussen. Es handelt sich also bei den betrachteten selbstorganisierenden Systemen um eine spezielle Art von Regelungssystemen, die allerdings den Aufbau der Systeme selbst betreffen.

## **6. Ereignisdiskrete Systeme**

Das Sachgebiet, das heutzutage die Bezeichnung Ereignisdiskrete Systeme trägt, hat eine längere Entwicklung durchlaufen. Zu Beginn war die Funktionalität solcher Systeme auf die Verarbeitung von Binärvariablen orientiert, die mittels logischer Operatoren (UND, ODER, NICHT) miteinander

verknüpft wurden. Daraus resultieren bei der technischen Umsetzung wiederum Schalthandlungen, welche zur Bezeichnung als Schaltsysteme führten. Dieser Name entsprach auch der damaligen Realisierungsform, die auf dem Einsatz schaltbarer Elemente, wie elektromagnetische Schütze und Relais beruhte. Je nachdem, ob die Steuerungen (binäre) Speicherelemente enthielten oder nicht, unterscheidet man zwischen sog. sequentiellen und kombinatorischen Steuerungen. Die theoretische Grundlage der kombinatorischen Steuerungen bildet die auf *G. Boole* zurückgehende Schaltalgebra. Das Rüstzeug für die später eingesetzten Steuerungen, welche auch Speicherelemente enthielten, liefert die Automatentheorie. Unter den vielfältigen Anwendungen solcher Binärsteuerungen seien nur die Steuerung von Aufzügen, Waschmaschinen, Lichtreklamen und Fertigungsanlagen verschiedenster Art genannt.

In der Folgezeit führten die Entwicklungen zur Erweiterung der Schaltbedingungen, indem außer den formallogischen auch vergleichs-, zeitbezogene und sogar arithmetische Operatoren einbezogen wurden. Dies führte dann zu einer Verallgemeinerung der Funktionsbeschreibungen vor allem unter Verwendung von Regeln der Art

WENN (*Bedingung*) DANN (*Schlussfolgerung* bzw. *Entscheidung*).

Auch die Bildung der Variablen änderte sich. Beschränkte sich die Verarbeitung zunächst auf Variable mit von Natur aus binärer Wertigkeit, so konnten nun auch die von Sensoren abgegebenen kontinuierlichen Signale verarbeitet werden, nachdem diese zuvor unter Verwendung eines Schwellwerttests binarisiert wurden. Die in den Regeln berücksichtigten Bedingungen wurden damit zu Ereignissen aufgewertet, die entweder eintreten oder nichteintraten. Daher stammt auch die neuere Bezeichnung „Ereignisdiskrete Systeme“.

Parallel zur Ausweitung der Funktionalität erfolgte auch eine mehrfache Umstellung der Realisierungsform solcher Steuerungen. Die eingesetzten Technologien wechselten hier vom Einsatz elektromagnetischer Schütze und Relais über die Verwendung fluidischer (pneumatischer) Elemente und bereits mit einfachen Verknüpfungen ausgerüsteten elektronischen Gattern, bis zu den heutzutage üblichen computerbasierten Lösungen in Gestalt der Speicherprogrammierbaren Steuereinrichtungen (SPS). Damit verbunden war auch der Ersatz der bisherigen verdrahteten Steuereinrichtungen durch modulare oder auch kompakte Gerätelösungen mit programmierbarer Funktionszuweisung. Mit der Einführung derartiger Implementierungen wurde der Projektant solcher Steuerungen mit dem Problem der Programmierung konfrontiert. Zur Abschwächung der diesbezüglichen Anforderungen wurden sog. Fachsprachen entwickelt, deren Gebrauch an die früher verwendeten verdrahteten Schaltungslösungen erinnert. Ereignisdiskrete Steuerungen mit Ablaufcharakter programmiert man indessen besser in einer ablauforientierten Sprache. Auch eine Programmierung in einer Hochsprache ist möglich, von der vor allem bei einer Implementierung der Steuerung durch einen Prozessrechner Gebrauch gemacht wird.

Ereignisdiskrete Steuerungen leisten heutzutage einen unverzichtbaren Beitrag insbesondere bei der Automatisierung von Abläufen in der Fertigung, im Transportwesen, Lagerhallen und vielen anderen Bereichen.

## **7. Autonome Systeme**

Eine weitere automatisierungstechnische Systemkategorie betrifft die autonomen Systeme. Ihr Wesen ist dadurch gekennzeichnet, dass sie in der Lage sind, die ihnen von einem Dienstgeber übertragenen Aufgaben selbstständig – also ohne dessen Zutun – auszuführen und am Ende die Erfüllung an denselben zurückzumelden. Die Tätigkeit der Dienstnehmenden ähnelt also der von Agenten, sodass diese Systeme auch als künstliche Agenten bezeichnet werden. Entsprechend einer anderen Betrachtungsweise kann man auch von Automatisierungssystemen mit Problemlösungscharakter

sprechen, da sie Probleme in einem eigenständig verfolgten Problemlösungsprozess einer Lösung zuführen.

Autonome Systeme handeln nicht nur selbsttätig, sondern agieren sogar selbstständig. Sie verkörpern somit eine qualitativ höherwertige Funktionalität. Die Besonderheit besteht allerdings darin, dass die durchlaufenen Lösungsschritte nicht abgespeichert werden. Bei wiederholter Bearbeitung des gleichen Problems muss also der Lösungsweg erneut ermittelt werden. Somit kann solchen Systemen nicht das Prädikat „intelligent“ zuerkannt werden.

Ein Beispiel für autonome Systeme sind Arbeitsroboter, deren Aufgabe in der Abfräsung der mit jedem Werkstück wechselnden Ausprägung ihrer Gussgrate besteht. Die größte Bedeutung werden die autonomen Steuerungen aber vermutlich in der mobilen Welt erlangen. Entsprechende Einsatzgebiete sind frei fliegende Drohnen, die in der Lage sind, Hindernissen auf ihrem Weg zum Zielort geschickt auszuweichen oder selbstständig agierende Flugkörper, welche den Empfängern Pakete von im Internet bestellten Waren zustellen. Bald wird es auch möglich sein, dass per Smartphone bestellte Leasingfahrzeuge von der jeweiligen Parkposition aus autonom zu ihrem Besteller vorfahren.

## **8. Lernfähige Systeme**

Im Zuge der Entwicklung der Automatisierungstechnik gelang es, Funktionsweisen zu realisieren, denen zurecht das Prädikat „intelligent“ zuerkannt werden kann. Dies bezieht sich vor allem auf die Fähigkeit des (maschinellen) Lernens. Lernen ist essentiell mit dem Erwerb und der Verarbeitung von Wissen verbunden. Lernfähige Systeme verfügen zu Beginn ihrer Tätigkeit noch über keinerlei Problemwissen. Ihr initiales Verhalten ist weitgehend zufallsbestimmt. Im Verlauf ihrer Tätigkeit wird zunehmend Wissen erlangt, das jedoch noch unvollständig ist. In dieser temporären Phase werden gelegentlich durchaus Fehler gemacht, welche ebenfalls dem Wissenserwerb dienen. Nach Erreichen des Lernziels agiert das System fehlerfrei. Es verfügt nun über das vollständige Problemwissen. Es ist damit in der Lage, jedes neue Problem der behandelten Art ohne Umschweife sofort und in optimaler Weise zu lösen. Damit sind Lernsysteme den adaptiven und problemlösenden Systemen überlegen.

Bezugnehmend auf die inzwischen unterschiedenen Lernformen handelt es sich bei den realisierten Lernsystemen vor allem um die Formen des Lernens mit Belehrung, das Lernen mit Bekräftigung sowie das Selbstlernen (*trial\_and\_error\_learning*). Das Trainieren von Systemen kann hingegen entsprechend den geforderten Leistungsmerkmalen nur als eine Vorstufe des Lernens eingestuft werden.

Das Lernen mit Belehrung setzt einen Lehrer voraus, der Lernelemente (Relationen von Situationen und vorgesehenen Reaktionen) vorgibt, die vom Lernenden (Schüler) übernommen, in geeigneter Form abgespeichert und verallgemeinert werden. Beim Lernen mit Bekräftigung ist die externe Instanz nur noch in abgeschwächter Form tätig, indem sie die vom lernenden System getroffenen Entscheidungen je nach Angemessenheit nur noch bekräftigt oder abschwächt. Beim Selbstlernen müssen die lernenden Systeme mangels einer äußeren Unterstützung selbst aktiv sein und können nur aus dem Erfolg oder Misserfolg ihrer Handlungen lernen.

Das Selbstlernen stellt offensichtlich die höchsten Anforderungen. Um ein gewisses Verständnis zu vermitteln, wie dieses anspruchsvolle Problem gelöst werden kann, wollen wir ein Beispiel dieser Art erläutern. Sein Wirkungsmechanismus basiert auf der Verwendung graphentheoretischer Methoden. Benutzt wird der Typ des gerichteten Graphen mit gewichteten Kanten. Die Knoten repräsentieren die während der Tätigkeit eingenommenen Zustände, während die Kanten die Zustandsübergänge erfassen. Die während der Zustandsübergänge ermittelte Qualität wird in Form von Gewichten gehandhabt, welche den jeweiligen Kanten zugewiesen und dort gespeichert werden.

Dementsprechend lässt sich für jede durchlaufene Kantenfolge (Pfad) ein Gesamtgewicht bestimmen, welches eine Aussage über die Qualität des Pfades liefert.

Im Verlauf der Tätigkeit des selbstlernenden Automaten wird zunächst eine zufällige, im späteren Verlauf des Lernprozesses dann eine nach einer geschickten Strategie vorgenommene Auswahl der nächstfolgenden Kante getroffen. Dabei kommt es zum schrittweisen Ausbau des Graphen unter Berücksichtigung der Pfadeigenschaften. Wurde im Verlauf der Systembewegungen der vorab definierte Zielknoten bzw. ein Knoten des Zielgebiets erreicht, so ist damit auch der optimale, vom Start- zum Zielknoten führende Pfad ermittelt. Bei weiteren Versuchen agiert der selbstlernende Automat nur solange unter Unsicherheiten, bis er auf einen markierten Knoten des optimalen Pfads trifft. Auf diese Weise werden die optimalen Pfade für alle Knoten bestimmt. Der Graf kann nun abgespeckt werden, indem alle nichtoptimalen Kanten gelöscht werden. Dabei entsteht ein Teilgraph, der optimaler Baum genannt wird.

Das (Selbst-)Lernen kann auch noch auf andere Weise gelöst werden. Weitere bekannte Lernformen sind das sog. *Hebb'sche* Lernen und daraus abgeleitete Formen, sowie das Wettbewerbslernen (competitive learning), Korrelations-, Kooperations-, Vergleichs- und Fehlerkorrekturlernen.

Lernfähige Automaten werden wegen ihres hohen Aufwandes meist nur in Sonderfällen eingesetzt. Dazu zählt beispielsweise die Weltraumtechnologie. Dort ist der Einsatz mobiler Roboter vorgesehen, um das Terrain zu erkunden und an geeigneten Stellen Arbeitsaufgaben durchzuführen. Die Bewegung solcher Fahrzeuge auf weit entfernten Himmelskörpern kann jedoch angesichts der Unkenntnis der vor Ort vorliegenden Topologie des Geländes und auch wegen der langen Signallaufzeiten nicht von der Erde aus gesteuert werden. Roboter, die dort manchmal jahrelang eigenständig tätig sind, müssen daher in solchen Fällen über die Fähigkeit des Selbstlernens verfügen. Diese bekommen dann von der Bodenstation aus lediglich ihre Bewegungsaufträge und ggfs. die zu erledigenden Arbeitsaufgaben vorgegeben, die sie dann selbstständig auszuführen haben. Dies geschieht unter erschwerten Bedingungen, zu denen etwa das zu erlernende Umfahren unbekannter Hindernisse gehört.

Auch auf unserem Planeten bieten sich verschiedenartige nützliche Einsatzmöglichkeiten für lernfähige Systeme. So wurden lernfähige Steuerungen und Regelungen realisiert, die manuell oder auch automatisch belehrt werden können. Ein großes Einsatzfeld sind auch Roboter, bei denen unterschiedliche Lernformen zum Einsatz kommen. Selbstlernende Automaten sind ebenfalls für agentenartige bzw. problemlösende Systeme bedeutsam, wenn bestimmte Handlungen wiederholt auszuführen sind. Ein interessantes Beispiel sind mobile Transportroboter, die in Krankenhäusern Dienst tun, indem sie Mahlzeiten an die Krankenbetten bringen, das Geschirr abräumen, Medikamente verteilen oder auch Wäsche transportieren. Dazu müssen sie lernen, sich in den oft ausgedehnten und über mehrere Stockwerke reichenden Räumlichkeiten zurechtzufinden. Lernfähiges Verhalten erlangt auch im automobilen Sektor eine zunehmende Bedeutung. Dort wird bereits an technischen Lösungen gearbeitet, die einmal in der Lage sein sollen, die Gewohnheiten des Fahrers, seines Fahrstils, des Arbeitsweges oder auch die turnusmäßig einzuhaltenden Termine im Verlauf ihres Einsatzes zu erlernen.

## **9. Spezielle Automatisierungssysteme**

Es gelingt nicht überall, die Vielzahl der entstandenen Automatisierungssysteme einer der vorgenannten Kategorien zuzuordnen. Dazu gehören die sog. Assistentensysteme, mit denen unsere Automobile in zunehmender Anzahl ausgerüstet sind. Dabei handelt es sich um das Antiblockiersystem, das elektronische Stabilitätsprogramm EPS, der adaptive Tempomat, der Notbrems- und Spurhalteassistent u. a.m. Diese automatisierungstechnischen Helfer entlasten je nach Aufgabe sowohl den Fahrer und schützen auch die Insassen weitgehend vor den Auswirkungen von Fehlhandlungen. Eine Steigerung des Komforts wird auch der Einparkassistent bieten, der bereits Funktionen autonomen Verhaltens realisiert. Weitere Bemühungen sind auch die der Entwicklung



verkehrssicherer Lösungen für das Problem des autonomen Fahrens gewidmet. Der prinzipielle Funktionsnachweis ist in speziellen Fällen bereits gelungen. Es ist wohl nur eine Frage der Zeit, bis der Reifegrad erreicht ist, bis die Erteilung der allgemeinen Straßenzulassung erfolgt.

Die genannten Einsatzfälle im Bereich der Automobile sind mit einem hohen Aufwand an Informationstechnologie verbunden. Dies betrifft einerseits den Einsatz einer Vielzahl von Sensoren unterschiedlicher Wirkprinzipien, deren Informationen miteinander in eigenständigen Sensormodulen verknüpft und ausgewertet werden. Die einzelnen Automatisierungsaufgaben werden wiederum eigenen Computern zugewiesen, die untereinander vernetzt sind. In vielen Fällen ist die Funktionsweise dieser verteilten Informationssysteme darauf gerichtet, anhand der Sensorsignale zunächst den aktuellen Fahr- bzw. Gefahrenzustand zu bestimmen. Entsprechend dieser Erkenntnis werden dann Entscheidungen getroffen. Diese führen je nach Gefahrengrad zur Ausgabe gestufter Warnmeldungen an den Fahrer unter Einsatz optischer, akustischer oder auch taktiler Mittel. Ignoriert der Fahrer diese Hinweise, so greift zuletzt die Automatik in den Prozess ein, um eine drohende Gefahr abzuwenden oder zumindest deren Folgen abzuschwächen.

Die derzeit laufenden Entwicklungen lassen die Integration der funkbasierten Kommunikation als weitere Komponente automatisierungstechnischer Systeme erkennen. Die Bestrebungen richten sich hier auf die Realisierung der sog. der Car-to-X-Communication, welche eine Verständigung der Fahrer untereinander über beobachtete Wetterlagen, Verkehrsunfälle oder Staus wie auch den Empfang von Verkehrsmeldungen über am Straßenrand aufgestellte Funkbaken ermöglichen soll. Eine andere funkbasierte Automatisierungslösung betrifft das selbsttätige Absenden der Meldung von Unfällen an eine Zentrale unter Angabe der näheren Umstände.

Auch das Teilgebiet der Teleautomatisierung verlangt Sonderlösungen. Die dort vorliegenden Systeme enthalten verteilte Automatisierungseinheiten, mit denen Menschen auf dem Funkweg kommunizieren können. Hier ist mit der modernen Haustechnik ein Anwendungsgebiet mit hohen Zuwachsraten im Entstehen. Diese Systeme bieten dem Benutzer die Möglichkeit, sich per Smartphone detailliert über den Zustand der Hausanlage zu informieren und bedarfsweise aus der Ferne auch Eingriffe unterschiedlicher Art vorzunehmen.

Auch im Zuge der Energiewende fallen Spezialaufgaben für die Automatisierungstechnik an, die neuartige Lösungen durchaus komplexer Natur verlangen. Dazu gehört beispielsweise das automatisierte Energiemanagement zur Realisierung einer autarken Versorgung von Wohneinheiten unter weitgehender Nutzung von Energien aus regenerativen Quellen. Bei der Verwertung solcher Energiearten treten typischerweise Fluktuationen auf, die im Sinne der Zielstellung einen Ausgleich verlangen. Dafür sind geeignete Maßnahmen unterschiedlicher Art zu treffen. Das oberste Ziel besteht darin, den regenerativ erzeugten Strom – soweit möglich – zur Deckung des Eigenbedarfs zu verwenden. Steht darüber hinaus weiterer Strom zur Verfügung, so soll dieser zur Ladung der hauseigenen Batterie genutzt werden. Ist die Batterie vollgeladen oder besteht ein weiterer Überschuss, so ist dieser Anteil gewinnbringend in das öffentliche Netz einzuspeisen. Reicht wiederum die selbst erzeugte regenerative Energie zur unmittelbaren Bedarfsdeckung nicht aus, so wird versucht, die Differenz aus der vorhandenen Batterie zu decken. Ist damit der Energiemangel nicht zu beheben, so wird im Notfall der fehlende Strom aus dem öffentlichen Netz entnommen.

## **10. Unkonventionelle Automatisierungssysteme**

Das funktionelle Repertoire der Automatisierungstechnik wurde in den vergangenen Jahrzehnten um einige recht unkonventionelle Verfahren bereichert. Diesen Verfahren sollen hier ebenfalls einige Betrachtungen gewidmet werden. Diese Verfahren sind von der Natur inspiriert und basieren auf ganz unterschiedlichen Prinzipien. Zu diesen aus der Natur abgeleiteten Verfahren gehören u. a. die Fuzzy-Technologie, die Evolutionsstrategien sowie künstlichen Nachbildungen Neuronaler Netze. Diese Prinzipien gehören einer Entwicklungsrichtung an, die als *Softcomputing* bezeichnet wird. .

## 10.1 Einsatz der Fuzzy-Technologie

Grundlage der zunächst betrachteten Fuzzy-Technologie bildet die von *L. A. Zadeh* ausgearbeitete Theorie der unscharfen Mengen. In Wahrheit handelt es sich hier um das Theoriegebäude einer unscharfen (fuzzy-)Logik. Im Gegensatz zu der bislang allein bestehenden formalen Logik auf der Basis logisch verknüpfter Binärvariabler benutzt das Fuzzy-Konzept unscharfe Variable. Dazu werden den unscharfen Variablen Mengen zugewiesen, die durch sog. Zugehörigkeitsfunktionen unscharf beschrieben werden, und welche sich auf einer Werteskala überschneiden. Dementsprechend gehört ein Signalwert i. A. zwei unscharfen Mengen, wenn auch in unterschiedlichem (Zugehörigkeits-)grad an. Die unscharfen Mengen repräsentieren qualitative Aussagen, wie „groß“, „klein“, „hoch“ oder „niedrig“, aber auch „grün“ oder „hellrot“ u. v. a. m. Solche auch in sprachlicher (linguistischer) Form ausdrückbare Mitteilungen bieten dann die Möglichkeit, funktionelle Sachverhalte in einer dem Menschen nahestehenden Weise zu beschreiben. Die geeignete Form dafür sind sog. Produktionsregeln. In dieser Darstellung können im Bedingungsteil sowohl einzelne als auch mehrere, durch logische Operatoren (UND, ODER, NICHT) verknüpfte Fakten enthalten sein. Dies sei am Beispiel einer für Regelungszwecke verwendbaren Regel verdeutlicht:

WENN (Regelabweichung = negativ klein UND Änderungsgeschwindigkeit = mittel)

DANN (Stellgrößenänderung = wenig)

In dieser Regelform ließe sich beispielsweise Funktion eines Heizungsreglers beschreiben. Mit der Notation solcher Produktionsregeln entsteht eine Gesamtheit von Regeln, die Regelbasis genannt wird. Diese muss jedoch vollständig und widerspruchsfrei sein, was gesondert zu prüfen ist. Während des Betriebs eines Fuzzy-Reglers wird die Regelbasis beständig durchmustert und dabei die jeweils zutreffenden Regeln ermittelt. Diese werden dann nach bestimmten Methoden einer unscharfen Schlussfolgerung unterworfen. Danach wird der Stellgröße ein Festwert zugewiesen.

Die hier benutzte Art des Reglerentwurfs bietet einige Vorzüge. Zum einen besteht die Möglichkeit, beim Menschen vorhandenes Regelungswissen unmittelbar auf ein technisches Gerät zu übertragen. Des Weiteren besitzt ein derart funktionsbestimmter Regler ein problemangepasstes, zumeist nichtlineares Verhalten und damit möglicherweise eine bessere Performance als ein klassisch entworfener Regler.

Der Entwurfsprozess umfasst außer der Eingabe der Fuzzy-Regelbasis noch die Festlegung der Form und Verteilung der Zugehörigkeitsfunktionen sowie die Eingabe des vorgesehenen Schlussfolgerungsmechanismus. Dieser nicht ganz einfache Entwurfsprozess kann durch Entwicklungswerkzeuge, genannt Fuzzy-Tools, unterstützt werden, die von mehreren Herstellern angeboten werden. Damit ist der Gebrauch der Fuzzy-Technologie dem Automatisierungsingenieur weitgehend zugänglich.

Die Anwendung der Fuzzy-Technologie in der Automatisierungstechnik ist keinesfalls auf die Regelungstechnik beschränkt. Im eigenen Umfeld wurde der Nachweis erbracht, dass mit dieser etwas exotischen Technologie auch komplexere Regelungssysteme mit adaptivem Verhalten sowie auch Optimisatoren realisiert werden können.

## 10.2 Anwendung von Evolutionsstrategien

Der Evolution verdankt die Welt das Entstehen einer ungeheuren Artenvielfalt von Lebewesen, an deren Spitze der Mensch steht. Wenn ein Naturprinzip zu derartigen Erfolgen führt, dann lohnt es sich, genauer nach den dort verwendeten Prinzipien zu schauen. Es ist wohl weitgehend der Pionierleistung von *I. Rechenberg* zu verdanken, dass es gelang, die der Natur abgeschauten Evolutionsstrategien zu algorithmisieren und technisch umzusetzen.

Evolutionsstrategien sind auf die Abfolge von Generationen gerichtet, welche Gruppen von Individuen wählbarer Größe enthalten und die sich zyklisch erneuern. Zunächst ist die Anzahl von Eltern und der

zugelassenen Nachkommen festzulegen. Die praktisch genutzten Evolutionsstrategien sehen dann die aufeinander folgende Anwendung unterschiedlicher Mechanismen vor. Dazu werden in jeder Generation zunächst die Nachkommen generiert, welche in besonderer Weise zustande kommen. Zunächst wird das Erbgut der Eltern durch Vererbung (Klonen) übertragen. Danach findet eine Mutation statt. Diese wird bei der künstlichen Evolution durch einen Zufallsprozess realisiert, dessen Anteil wählbar ist. Damit erlangen die Nachkommen eine individuelle Komponente, die für das Entstehen von Varianten sorgt. Die auf diese Weise erzeugten Nachkommen müssen sich anschließend – möglicherweise zusammen mit ihren Eltern – einem Leistungstest stellen, der zur Auswahl der Tüchtigsten führt (survival oft he fittest). Dieser Teilschritt wird Selektion genannt. Evolutionsstrategien bieten darüber hinaus zahlreiche weitere Möglichkeiten der Gestaltung. Dazu zählt die Art der Auswahl der Eltern bei der Nachkommenserzeugung, die Möglichkeit der Einbeziehung der Rekombination u. a. m. Es können auch mehrere Populationen vorgesehen werden, die entweder in jeder Generation im Austausch stehen oder sich über mehrere Generationen hinweg getrennt entwickeln und erst danach austauschen. Es bestehen somit zahlreiche Freiheitsgrade, über die beim Entwurf von Evolutionsstrategien verfügt werden kann.

Evolutionsstrategien bieten ein alternatives Optimierungsverfahren mit speziellen Eigenschaften. Ihre Anwendung ist auf zweierlei Weise möglich. Die eine Form ist die experimentelle Optimierung, bei der der Evolutionsprozess auf praktische Weise realisiert wird. Dazu müssen die Parameteränderungen in jedem Generationsschritt sozusagen „von Hand“ vorgenommen und auch die Anwendungen auf die einzelnen Individuen serialisiert werden. Die Handhabung dieser Methode ist daher recht aufwändig, und es können wohl auch nur einfache Strategien eingesetzt werden.

Die zweite Möglichkeit der Realisierung künstlicher Evolutionsprozesse sieht eine Behandlung in modellhafter Form unter Verwendung von Computern vor und hat somit virtuellen Charakter. Diese Art der evolutionstechnischen Optimierung ermöglicht die Anwendung leistungsfähigerer Evolutionsstrategien und ist auch in der Handhabung weitaus komfortabler. Die Funktionszuweisung erfolgt hier durch Programmierung. Obwohl für die Programmierung von Evolutionsprozessen in der Anfangsphase auch die einfache Sprache BASIC eingesetzt wurde, verwendet man heutzutage dafür ausschließlich Hochsprachen. Tools, welche den Einsatz von Evolutionsstrategien unterstützen, sind hingegen kaum kommerziell verfügbar. Dies war uns Anlass für eine Eigenentwicklung, die zum Entstehen der Evolutions-Strategischen Maschine ESM-1 führte. Die hierbei erhaltene Gesamtlösung beinhaltet neben einer bequemen Bedienerführung einen programmierbaren Modul für das jeweilige Anwendungsobjekt, eine Design-Komponente zum geführten Entwurf einer Evolutionsstrategie sowie eine Ablaufkomponente mit Überwachung.

Die Erstanwendung von Evolutionsstrategien betraf die Optimierung eines Tragflächenprofils für Flugzeuge auf Grundlage der experimentellen Strategieanwendung. Seither hat sich das Spektrum der Einsatzfälle stark ausgeweitet. Zu den bekannt gewordenen Anwendungsfällen gehören die Optimierung von Baukörpern (Brücken, Tragwerken, Rohrformen, -krümmern, Düsen), optischen Produkten (Linsen, optische Systeme), die Gestaltung von Kabelnetzen, Routenplanung u. a. m.

Es wurden auch verschiedene Einsatzmöglichkeiten der Evolutionsstrategien in der Automatisierungstechnik untersucht. Besonders geeignete Anwendungsmöglichkeiten zeigten sich auf den Gebieten der Systemidentifikation, adaptiven Modellbildung sowie der Parameteroptimierung dynamischer Systeme insbesondere von Reglern.

### **10.3 Einsatz Künstlicher Neuraler Netze**

Angesichts seiner beeindruckenden kognitiven Leistungen findet das menschliche Hirn seit langem das besondere Interesse der Forschung. Maßgebend dafür sind insbesondere seine immensen Fähigkeiten der Informationsverarbeitung und –speicherung wie auch die darauf gegründeten Eigenschaften der Verallgemeinerung, Adaption und des Lernens. Diese Fähigkeiten haben auch andere Wissenschaftler auf den Plan gerufen, die sich von Erkenntnissen der Untersuchung dieses

Organs wesentliche Anregungen für neuartige Lösungen versprechen. Ansatzpunkt diesbezüglicher Bemühungen waren aus der Neurowissenschaft stammende Erkenntnisse über die strukturelle Beschaffenheit des Gehirns. Diese haben inzwischen zu Nachbildungen neuronaler Strukturen geführt, die unter der Bezeichnung Künstliche Neuronale Netze (KNN) laufen. Daraus sind zahlreiche Anwendungen hervorgegangen, die auch das Gebiet der Automatisierungstechnik betreffen.

Die Künstlichen Neuronalen Netze können als leistungsfähige Informationsverarbeitungssysteme einer völlig andersartigen Architektur verstanden werden, welche aus einem netzartigen Geflecht miteinander gekoppelter Neuronen bestehen. Die Neuronen sind die funktionellen Kerne solcher Netze, welche auch als Prozesseinheiten (PE) genannt werden. Aus der Vernetzung derartiger Elemente folgt eine dezentrale Verarbeitungs- und Speicherstruktur, die eine inhärente Parallelverarbeitung von Informationen ermöglicht und auch eine höhere Fehlertoleranz verspricht. Die zweite Besonderheit Künstlicher Neuronaler Netze besteht darin, dass diese nicht in klassischer Weise programmiert, sondern trainiert werden. Diese Art der Funktionszuweisung macht sie für viele Anwendungen, auch automatisierungstechnischer Art, interessant. Genug der Gründe also, um sich dieser neuartigen Lösungsart für Aufgaben der Informationsverarbeitung zuzuwenden.

Dazu ist zunächst ein Blick auf die technische Umsetzung der Komponenten und Strukturen Künstlicher Neuronaler Netze zu werfen. Das hier benutzte funktionelle Konzept basiert auf der Verwendung binärwertiger Größen. Die ersten Vorschläge zur Modellierung von Neuronenmodellen stammen von *McCulloch* und *Pitts* und sehen eine Gewichtung der Eingangssignale mit Summenbildung und nachfolgendem Schwellwerttest zur Bildung des Ausgangssignals vor. Spätere Vorschläge sehen anstelle der Schwellwertfunktion sigmoidale und pseudolineare Entscheidungsfunktionen vor. Verfeinerte Neuronenmodelle benutzen auch andere Arten der Verknüpfungen zwischen dem jeweiligen Eingangsvektor und dem (gespeicherten) Gewichtsvektor sowie auch unterschiedliche Ähnlichkeitsmaße.

Neuronenmodelle wurden auch in Hardware ausgeführt, wobei sowohl die Standard-VLSI-Technik zum Einsatz kam als auch analoge bzw. digitale Neuro-ASICs bereitgestellt wurden. Damit war eine Hardware-Basis verfügbar, welche die Realisierung von Computern neuartiger Architektur ermöglichte.

Außer den Neuronenmodellen sind auch die Netzstrukturen zu beleuchten. Die verwendeten Netze sind schichtenartig organisiert und ermöglichen wahlweise eine vorwärts oder rückwärts gerichtete Signalübertragung ggf. mit der Möglichkeit eines Queraustauschs. In den Knotenpunkten solcher Netze sind dann die künstlichen Neuronen platziert. Die in den Anwendungen verwendeten Netze enthalten aus Aufwandsgründen eine nur eine im Vergleich zum menschlichen Gehirn ( $10^{11}$  Neuronen) geringe Anzahl von Neuronen.

Für den allgemeinen Gebrauch hat sich die Verwendung bestimmter Standardmodelle herausgebildet. Zu den bedeutendsten Vertretern Künstlicher Neuronaler Netze zählt das Multilayer Perceptron, welches eine mehrschichtige Struktur mit vorwärts gerichteter Signalübertragung besitzt. Andere Modelle mit spezifischen Eigenschaften sind die Kohonen- und Hopfield-Netze, die selbstorganisierenden Feature Maps (SOM), CMAC-Netze sowie die Radial Basic Functions (RBF).

Künstliche Neuronale Netze versprechen auf Grund ihrer besonderen Eigenschaften vielfältige Einsatzmöglichkeiten. Neben der Realisierung spezieller Computer, insbesondere in Form von Parallelrechnern, liegen die Anwendungen hauptsächlich auf den Gebieten der Signalverarbeitung und -analyse, Mustererkennung/Klassifikation (Bild-, Sprach-, Sprechererkennung), Diagnose (Qualitätskontrolle, Geräuschanalyse, Fehlerortung) und Prädiktion (Vorhersage von Börsenkursen, Wetterkapriolen, voraussichtlicher Medienbedarf). Die automatisierungstechnischen Anwendungen beziehen sich vor allem auf Aufgaben der Prozessüberwachung, Modellbildung sowie Reglernachbildung insbesondere mit Prädiktions- und Adaptioneigenschaften. Dabei spielt auch die Trainierbarkeit der Automatisierungsfunktionen eine wesentliche Rolle. Auch die Robotik bietet

vielfältige Einsatzmöglichkeiten, etwa bei der Funktionszuweisung durch sog. Teachen, der komplexen Koordinatentransformation, Handlungsplanung anderen Aufgaben.

Die Verwendung Künstlicher Neuronaler Netze erfordert leistungsfähige Ressourcen und umfangreiche Trainingsdatensätze. Auch das Design ist nicht unproblematisch. Daher sind Tools gefragt, welche die Tätigkeiten beim Entwurf unterstützen. Diesbezüglich besteht ein breites Angebot an kommerziellen Tools, die sich nicht nur im Preis, sondern auch im Umfang der gebotenen Unterstützung, der Vielfalt der wählbaren Netzmodelle, den gebotenen Diagnosemöglichkeiten, der Einbindung von Anwendungen sowie der Art und Automatisierbarkeit des Trainings unterscheiden.

## **Epilog**

Die vorstehenden, auf die Automatisierung gerichteten Darlegungen sollen die Aufmerksamkeit auf ein bedeutsames Fachgebiet lenken und einen Überblick über den dort erreichten hohen Entwicklungsstand bieten. Die Ausführungen gründen sich auf Berufserfahrungen des Autors auf dem Gebiet der Kybernetik und speziell der Automatisierungstechnik durch Tätigkeiten in der Praxis, industriellen Forschung und vor allem langjähriges Wirken an Universitäten.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde die Behandlung in Teilkomplexe gegliedert, die den grundlegenden Wirkprinzipien der Automatisierung entsprechen. Angesichts der gewählten Form der Veröffentlichung musste die Erläuterung der jeweiligen Komplexe knapp gehalten werden. Dies mag bei manchem Leser den Wunsch nach detaillierterer Information aufkommen lassen. Dieser Bedarf kann durch den Rückgriff auf die im Handel erhältliche umfangreiche Fachliteratur gestillt werden. Eine kürzer gehaltene und dennoch breit angelegte Informationsquelle bietet das nachfolgend genannte Fachbuch. Mit der Verfügbarkeit des Internets können ebenfalls von dort Informationen zu speziellen automatisierungstechnischen Themen erlangt werden. Schließlich sind auch Beiträge zu möglicher Weise interessanten Gebieten auf dem hier ebenfalls genutzten Medium des edoc-Servers der Humboldt-Universität zu Berlin zu finden.

## **Literaturhinweis:**

Weller, W.: Automatisierungstechnik im Überblick – Was ist, was kann die Automatisierungstechnik? Beuth Verlag GmbH Berlin.Wien.Zürich, 2008, ISBN 978-3-410-16760-0